

УДК 681.3:624.044:624.15

А. С. Моргун, д. т. н., проф.; Д. І. Кательніков, к. т. н., доц.;
І. А. Моргун, аспірант

ІДЕНТИФІКАЦІЯ НЕСУЧОЇ ЗДАТНОСТІ ПАЛЬ МЕТОДАМИ НЕЧІТКОЇ ЛОГІКИ Й МЕТОДОМ ГРАНИЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ

В статті запропоновано ідентифікацію числовим методом граничних елементів і нечіткими базами знань нелінійної задачі геомеханіки – прогнозування несучої спроможності будівельних паль в залежності від фізико-механічних властивостей ґрунтів та довжини паль. Для вирішення цієї задачі використано генетичні алгоритми оптимізації, які більш ефективні при пошуках глобального мінімуму.

Ключові слова: метод граничних елементів, напружено-деформований стан, нечітка логіка, навчальна вибірка, генетичні алгоритми, ґрунти, несуча спроможність паль.

Вступ

Однією з основних задач, що постають при проектуванні будівельних об'єктів, є оцінка несучої здатності фундаментної конструкції споруди, зокрема паль. Опір паль статичним навантаженням викликає багато дискусій [1-4].

Наявність у масі неоднорідного ґрунту включень у формі фундаментної конструкції призводить до перерозподілу й скривлення напруг вільного поля ґрунту. Через складність і погану зумовленість цієї задачі геомеханіки, її неможливо описати точними аналітичними залежностями [2]. Тому для її рішення (в утробі бажанню точності) залишається обмежитися дещо розмитими, наближеними, але якісними рішеннями. Такими є методи прийняття рішень нечіткої логіки, вони досить повно розроблені, використовуються в різних галузях людської діяльності і на сьогодні актуальні й перспективні завдяки швидкому розвитку ЕОМ. Використання законів логічних міркувань у сполученні з ЕОМ дозволило створити штучні інтелектуальні системи, які працюють на рівні експерта [5, 6].

Сучасні інтелектуальні технології прийняття рішень відкривають можливості використання нових підходів для розрахунків і проектування фундаментів споруд. Задача прогнозування несучої здатності будівельних паль є типовою нелінійною задачею механіки ґрунтів через багатфакторний вплив на несучу здатність фізико-механічних властивостей ґрунтів і довжини паль [4]. У статті вперше в технічній літературі проведено ідентифікацію цієї нелінійної задачі геомеханіки про визначення несучої здатності висячих паль за допомогою нечітких баз знань для прийняття рішень. Проведено порівняння результатів з розв'язком цієї задачі за числовим методом граничних елементів (МГЕ).

Задача визначення несучої здатності паль за конкретних ґрунтових умов вирішена завдяки об'єднанню переваг структури нечіткої логіки (вона включає експертні знання про об'єкт у вигляді лінгвістичних висловлювань типу «якщо - то») й еволюційних (генетичних) алгоритмів, котрі дозволяють шукати оптимум рішення задачі одночасно з декількох точок. Нечітка логіка дозволила отримати експертні знання про структуру об'єкта, це був етап грубого налаштування нечіткої бази знань. Генетичні алгоритми налаштовували нечіткі бази знань. Узагальнена нечітка модель розглядається як апроксиматор нелінійної залежності між несучою спроможністю паль, їхньою довжиною й багаточисленними характеристиками ґрунтової основи.

Початкові умови. Постановка задачі

Розв'язок нелінійної задачі геомеханіки тісно пов'язаний з дослідженням напружено-деформованого стану (НДС) ґрунту й зустрічається із труднощами десперстності ґрунту й

великої кількості факторів, що впливають на їх поведінку.

Мінливість процесу деформування ґрунту фундаменту споруди в роботі досліджено чисельним МГЕ за дилатансійною математичною моделлю [1]. Основні рівняння теорії пружності, які описують поведінку фундаментної конструкції – палі в ґрунті, в МГЕ зведено до інтегрального рівняння, отриманого К. Бреббія, Ж. Теллесом [2]:

$$c_{ij} \cdot u_j + \int_{\Gamma} p^*_{ij} u_{ij} d\Gamma = \int_{\Gamma} u_{ij}^* p_i d\Gamma + \int_{\Omega} \sigma^*_{jk} \varepsilon_{jk}^p d\Omega, \quad (1)$$

де u – заданий вектор переміщень на границі палі; p – вектор напруг на границі палі, який треба знайти; u^* , p^* , σ^* – ядра граничного рівняння – рішення Р. Міндліна при $P=1$ у півпросторі для переміщень, напруг і похідних від напруг; C_{ij} – матриця, визначена з умов руху тіла як цілого; Γ , ξ , x – відповідно: границя, точка прикладання $P=1$, точка спостереження.

Рівняння (1) є граничним інтегральним рівнянням щодо значень функцій на границі досліджуваного об'єкта (поверхні палі), які треба знайти. Ця важлива обставина надає найбільшої привабливості цьому рівнянню, яке стає вельми прийнятним для досліджень числовими методами.

Використання в нелінійних задачах геомеханіки в якості фундаментальних рішень залежностей Р. Міндліна для півпростору не потребує подання в дискретній формі граничної поверхні землі, це значно знижує обсяг обчислювальних робіт. Більш того, завдяки симетрії розглянутої області (палі) щодо вертикальної осі, була дискретизована і розглянута тільки половина палі (рис. 1).

Визначення несучої здатності палі в статті проведено з урахуванням наявності областей граничного стану дисперсного ґрунту, які розвиваються під навантаженнями. Поведінку ґрунту в пластичній стадії описано теорією пластичної течії. Для врахування дисипативних ефектів ґрунту до рівняння (1) додавалися : а) – критерій переходу в пластичний стан – умова пластичності Мізеса – Губера – Боткіна (припускає руйнування по октаедричних площадках); б) – фізичні рівняння – залежність між напругами й деформаціями для пластичного стану ґрунту – неасоційований закон течії:

$$d\varepsilon_{ij}^p = d\lambda \frac{dF}{d\sigma_{ij}}, \quad F \neq f, \quad (2)$$

де F – пластичний потенціал (дисипативна функція пористого середовища ґрунту), f – критерій переходу до пластичного стану, $d\lambda$ – скалярний множник.

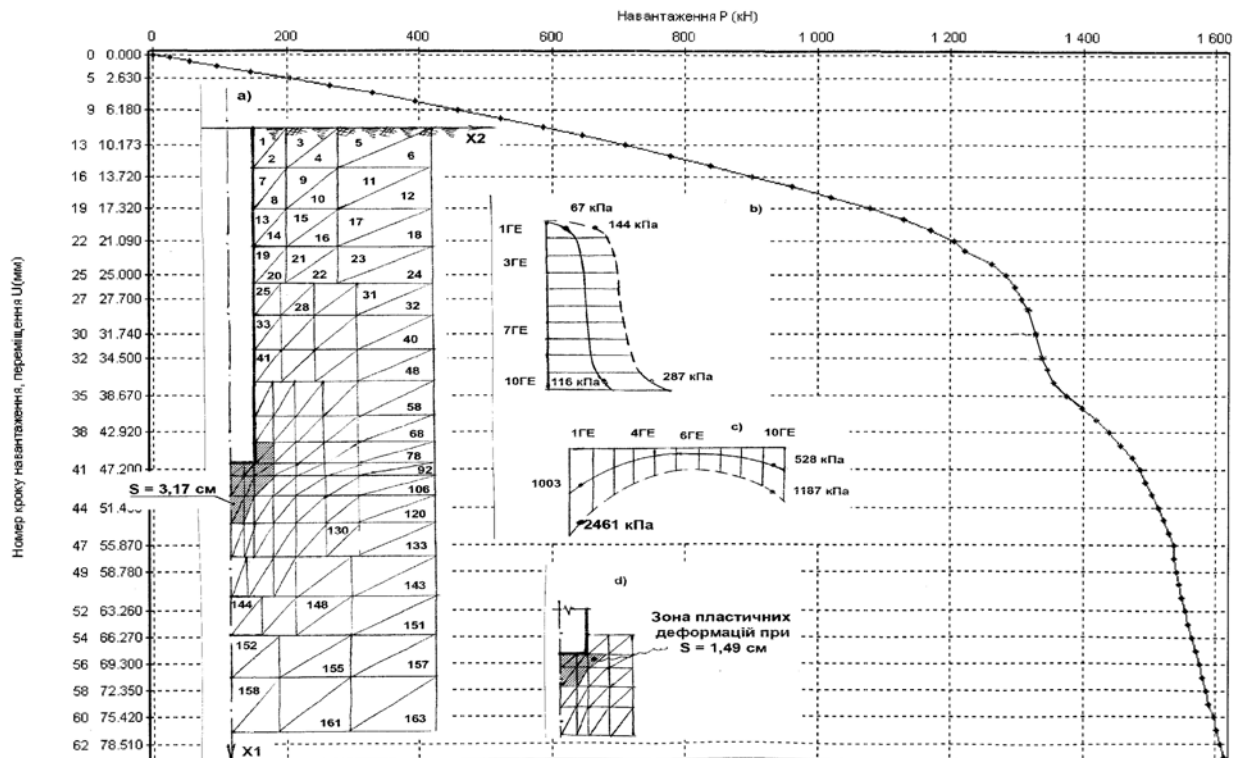


Рис. 1. а) схема дискретизації активної зони висючої палі $L=10$ м; в, с) – епюри дотичних напруг по бічній поверхні; епюри нормальних напруг по вістря палі; d) – зона пластичних деформацій при $S=1.49$ см.

Для корегування неспіввідності тензорів напруг і тензорів деформації при роботі основи в пластичній стадії використано дилатансійну теорію В. М. Ніколаєвського, І. П. Бойка [3, 4]. Запропонована дилатансійна модель з'єднує розрахунок основ за обома граничними станами (по деформаціях і несучій здатності) у рамках єдиної розрахункової схеми. На рис. 1 у рамках запропонованої моделі спрогнозовано несучу здатність палі довжиною 10 м для конкретних ґрунтових умов. З метою відпрацювання параметрів алгоритму й оцінки неточностей результату проведено зіставлення даних розрахунку за МГЕ з експериментом, табл. 5.

Останнім часом через подорожчання будівництва натурні дослідження паль стали дорогими, їх проведення не завжди можливо. Навіть коли вони проведені в умовах будівельного майданчика, геологічні умови майданчика досить часто відрізняються. Таким чином, у коректно поставлену модель підставляються не дуже коректні початкові дані. У статті пропонується також підхід, заснований на описі причинно-наслідкових зв'язків між факторами ризику (причинами), які впливають на несучу здатність паль, і конкретним прогнозом (наслідком) у вигляді виразів природного мовлення. У таких умовах невизначеності для моделювання причинно-наслідкових зв'язків використовувалася нечітка логіка й генетичні алгоритми [5].

У більшості країн несуча здатність паль по ґрунту визначається за двокомпонентною схемою: залежно від довжини палі й фізико-механічних властивостей ґрунту. Великий розкид при визначенні несучої здатності паль як теоретичними, так і експериментальними методами (статичні і динамічні) свідчить про необхідність удосконалення методів розрахунку паль із метою підняття точності, економічності, надійності проектування. Постановка задачі звучить так: дано вектор фіксованих значень вхідних змінних (фізико-механічних властивостей ґрунтів G і довжини палі L).

$$F = f(G, L) . \quad (3)$$

На підставі інформації про вхідний вектор визначимо вихід – несучу здатність палі F . Для

формування залежності (3) розглянемо вхідні й вихідні змінні як лінгвістичні змінні:

$$G = f_G(P, D, Sr); \quad P = f_P(E, c, x); \quad D = f_D(e, c, u); \quad (4, 5, 6)$$

де P – міцнісні характеристики ґрунту; D – деформативні характеристики ґрунту; E – модуль деформації ґрунту (МПа): [75-6]; x – коефіцієнт Пуассона (бічного розширення ґрунту): [0.27-0.42]; c – щільність ґрунту (г/см³) [1.54-2.76]; C – коефіцієнт зчеплення (КПа): [0.5-90]; φ – кут внутрішнього тертя (радіани): [0.122-0.75]; Sr – ступінь вологості ґрунту: [0-1]; e – коефіцієнт пористості ($V_{\text{пор}}/V_{\text{тв}}$): [0.45-1.05]. У квадратних дужках зазначено інтервал зміни вхідних даних.

Модель об'єкта діагностування побудовано на підставі нечітких логічних рівнянь, які зв'язують терми функцій належностей вхідних параметрів.

Переваги застосування нечітких логічних рівнянь в тому, що вони дозволяють застосовувати для побудови моделі знання експерта, виражені в природній мовній (словесній) формі.

Перший етап побудови нечіткої моделі об'єкта (фазифікація змінних) складається з визначення лінгвістичних оцінок змінних і відповідних їм функцій належностей. Структура моделі прогнозування несучої здатності палі показана на рис. 2 у вигляді дерева логічного взаємозв'язку, яким є граф, що відображає класифікацію причин, впливаючих на прогнозування показника F .

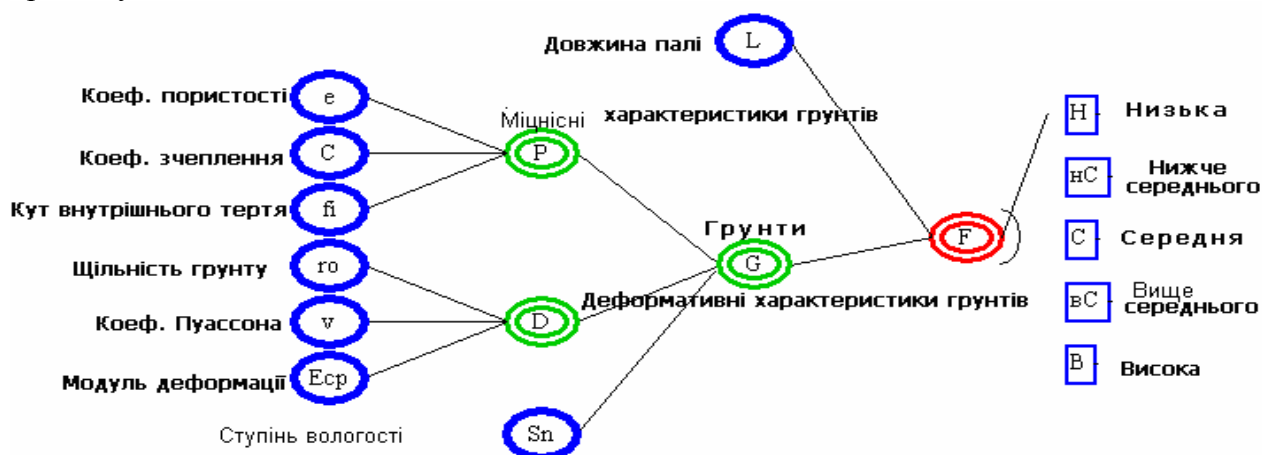


Рис. 2. Ієрархічна класифікація моделі нечіткої логіки

Граф відповідає співвідношенням (3 – 6). Для оцінки значень лінгвістичних змінних L , G , P , D використана шкала якісних термів: H – низький, C – середній, B – високий. Діапазон зміни вихідної змінної F квантувався в 5 рівнях. Кожний якісний лінгвістичний терм є нечіткою множиною, заданою за допомогою функцій належності, що перетворює лінгвістичну інформацію у форму, придатну для обробки на ЕОМ.

Наступний крок моделювання – складання експертної бази знань. Нечітка база знань є носієм експертної інформації про причинно-наслідкові зв'язки між вхідними й вихідними параметрами. Користуючись прийнятими якісними термами й знаннями експертів, співвідношення 3 – 6 представимо у вигляді нечітких ієрархічних баз знань, які наведені в таблицях 1 – 4. Ці матриці відповідають нечітким правилам “якщо – то”, складеним на підставі знань експерта [5]. Нелінійні залежності “якщо – то” представляють концентрацію досвіду фахівця й відіграють визначальну роль у практиці рішення людиною прикладних задач.

Таблиці 1 – 4

Експертні бази знань для функцій F, G, P, D														
L	G	F	P	D	S _R	G	ε	c	φ	P	E	ρ	v	D
H	H		H	H	B		H	B	H		C	B	H	
H	C	H	H	C	C		C	C	H		C	B	C	
H														
C	H		H	C	B	H	C	B	H		B	H	H	
		H												
H	B	C	H	B	H		C	B	C		B	H	C	
H														
C	C		H	B	C		B	H	H	H	B	C	H	
C	H		H	B	B		B	H	C		B	C	C	
H			C	C	B		B	C	H		B	B	H	H
C	B	C	C	B	C		B	C	C		B	B	C	
C	C		C	B	B		B	C	B		B	B	B	
BC	H		B	B	B		B	B	H		H	C	H	
B	H													
			H	H	H		B	B	C		H	B	H	
C	B	BC	H	H	C		B	B	B		H	B	C	
BC	C		H	C	H		H	C	H		C	H	H	
B	C		C	H	B		H	B	C		C	H	C	
			C	C	H		C	H	H		C	C	H	
BC	B	B	C	C	C		C	C	C	C	C	C	C	
B	B		C	B	H		C	B	B		C	C	B	
			B	H	B	C	B	H	B		C	B	B	C
			B	C	C		H	H	H		B	H	B	
			B	C	B		H	H	C		B	C	B	
			B	B	H		H	H	B		H	H	H	
			B	B	C		H	C	C	B	H	H	C	
			C	H	H		H	C	B		H	H	B	
			C	H	C		H	B	B		H	C	C	
			B	H	H	B	C	H	C		H	C	B	B
			B	H	C		C	H	B		H	B	B	
			B	C	H						C	H	B	

Синтез сукупності правил “якщо – то, або”, складених відповідно до таблиць 1 – 4 дає 13 логічних рівнянь, що представляють нечітку базу знань.

$$M^B(F) = M^{BC}(L) * M^B(G) * M^B(L) * M^B(G);$$

$$M^{BC}(F) = M^C(L) * M^B(G) * M^{BC}(L) * M^C(G) * M^B(L) * M^C(G);$$

$$\dots\dots\dots (7)$$

$$\begin{aligned} \mu^H(D) = & \mu^C(E) * \mu^B(\rho) * \mu^H(v) * \mu^C(E) * \mu^B(\rho) * \mu^C(v) * \mu^B(E) * \mu^H(\rho) * \mu^H(v) * \mu^B(E) * \mu^H(\rho) * \mu^C(v) * \\ & \mu^B(E) * \mu^C(\rho) * \mu^H(v) * \mu^B(E) * \mu^C(\rho) * \mu^C(v) * \mu^B(E) * \mu^B(\rho) * \mu^H(v) * \mu^B(E) * \mu^B(\rho) * \mu^H(v) * \\ & \mu^B(E) * \mu^B(\rho) * \mu^H(v) * \mu^B(E) * \mu^B(\rho) * \mu^C(v) * \mu^B(E) * \mu^B(\rho) * \mu^B(v). \end{aligned}$$

Нечіткій базі знань (7) відповідає така апроксимація досліджуваного об'єкта [1]:

$$F = \sum_i^5 F_i \mu_i^T / \sum_i^5 \mu_i^T ; \quad \mu^{jp}(x_i) = \frac{1}{1 + [\frac{x_i - b_i^{jp}}{c_i^{jp}}]^2} ; \quad (8, 9)$$

де $\mu^{dj}(F)$ – функція належності вихідної змінної F до класу $d_j \in [F_{j-1}, F_j]$; $\mu^{jp}(x_i)$ – функція належності вхідної змінної X_i до терму; b_i^{jp}, c_i^{jp} – параметри настроювання функцій належності, їхня інтерпретація: b – координати максимуму, $\mu(b) = 1$; c – параметр концентрації (стиску-розтягу).

Суть настроювання моделі прогнозування полягає в підборі таких параметрів функції належності (b , c) і ваг нечітких правил (w), які забезпечують мінімум відхилення між модельними даними й даними навчальної вибірки.

Механізм навчання нечіткої моделі реалізований шляхом проведення нелінійної оптимізації середньоквадратичної помилки й модельних результатів значення виходу нечіткої моделі. Для розв'язку задачі нелінійної оптимізації використано генетичні алгоритми. Імітуючи процеси живої природи, вони ефективніші в пошуках глобального оптимуму, дозволяють вести пошук з різних точок, тоді, як класичні методи лінійного програмування орієнтовані на пошук локального оптимуму. У результаті навчання отримані значення параметрів функцій належності нечітких термів і вагових коефіцієнтів правил баз знань (рис. 3).

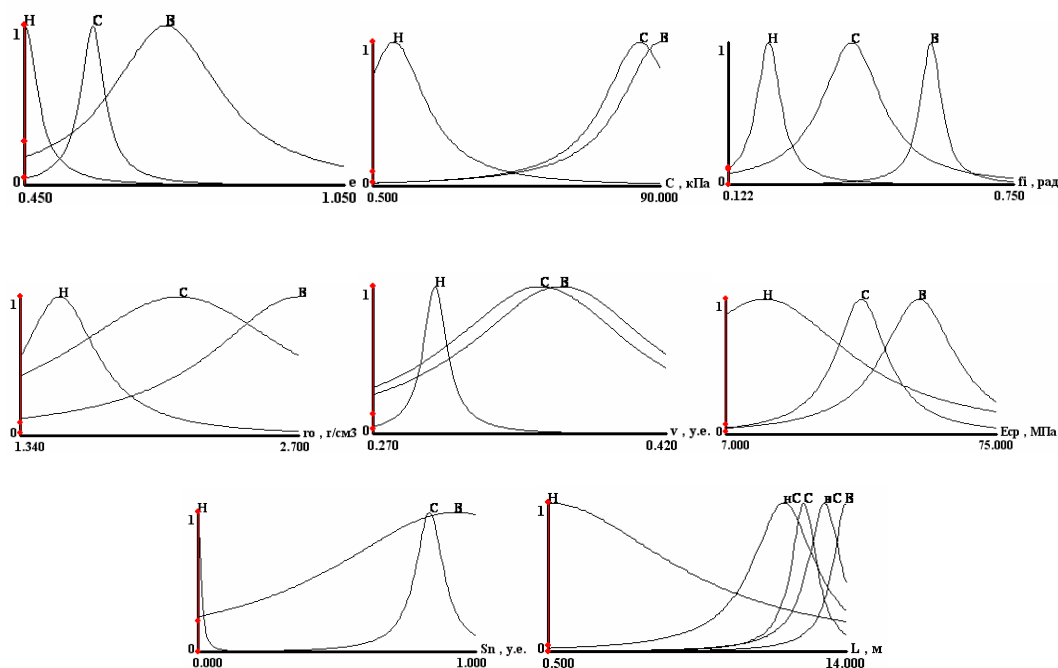


Рис. 3. Вид функцій належностей вхідних термів після навчання

Для настроювання й тестування нечіткої моделі прогнозування використовувалася навчальна вибірка, складена за даними експериментів і результатів числового моделювання за методом скінчених елементів (МСЕ) і методом граничних елементів (МГЕ). Фрагмент тестування вибірки показано у таблиці 5, в останній колонці наведено результати прогнозування несучої здатності палі після навчання нечіткої мережі.

Таблиця 5

Навчальна вибірка

№	L(м)	E(МПа)	ν	C(кПа)	φ (радіан)	S Sr	$\frac{e}{\rho(CM^3)}$	e	Фекспер. (кН)	Фмодельне (кН)
1	3	8	0,35	12	0,331	0,1	1,45	0,85	329,35	353,6
2	4	60	0,3	0,5	0,593	0,283	1,67	0,45	400	407,75
3	4,65	30	0,3	16	0,61	0,425	1,68	0,64	668	600,7
4	7	14,5	0,37	21,5	0,314	1	2,65	0,72	450	583,56
5	8,5	30,91	0,3	9,56	0,54	0,482	2,68	0,55	630	686,83
6	9,5	16	0,37	12	0,349	0,524	2,68	0,89	720	710,91
7	10	15,47	0,394	27	0,213	0,498	1,931	0,55	1160	1151,34
8	12,7	16,93	0,382	17	0,348	0,953	1,96	0,69	830	1109,95
9	13	17,19	0,39	18	0,348	0,875	1,98	0,72	1060	1167,96
10	14	22,84	0,382	20	0,349	0,978	1,96	0,70	1680	1480,03
11	9	8,87	0,3	1,488	0,2093	1	1,663	0,684	1008	876,8
.
22	6	36	0,3	7,2	0,584	0,3	2,67	0,55	400	407,75
23	6	16,74	0,334	13,17	0,414	1	2,25	0,65	610	526,12
24	6	21	0,42	16	0,75	0,23	1,74	0,5	1375	1231,1
25	9	8,87	0,3	1,49	0,209	1	1,66	0,673	840	877,78

Задача реалізована на базі програмної оболонки Fuzzy Expert. Час налаштування задачі за генетичним алгоритмом склав 30 хв і потребував 55000 ітерацій.

Висновки

Точність діагностування несучої здатності паль методом граничних елементів і методами теорії нечіткої логіки становить 7 – 10% , що є прийнятним для практичних завдань. Суть моделі нечіткої логіки – ідентифікація нелінійної залежності несучої здатності палі від її довжини й фізико-механічних властивостей ґрунтів нечіткою базою знань. Достовірні результати моделювання отримані настроюванням нечітких правил відповідно до даних навчальної вибірки, тобто вибором параметрів функцій належностей нечітких термів і ваг правил шляхом оптимізації генетичними алгоритмами.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Моргун А.С. Застосування методу граничних елементів у розрахунках паль у пластичному середовищі ґрунту. – Вінниця: Універсум-Вінниця, 2001. – 64 с.
2. Бреббья К., Уокер С. Застосування методу граничних елементів у техніку. – М.: Мир, 1984. – 248с.
3. Миколаївський В.Н. Сучасні проблеми механіки ґрунтів // Визначальні закони механіки ґрунтів. – М.: Стройиздат, 1975. – С.210 – 227.
4. Жваво Й.П., Цукрів В.О. Напружено-деформований стан ґрунтового масиву при прибудові нових фундаментів поблизу існуючих будинків // Основи й фундаменти: Міжвідомчий науково-технічний збірник. – К.: КНУБА, 2004. – Вип. 28. – С. 3 – 10.
5. Ротштейн А.П. Інтелектуальні технології ідентифікації: нечіткі безлічі, нейронні мережі, генетичні алгоритми. Вінниця: Універсум-Вінниця, 1999. – 320 с.
6. Митюшкин Ю.И., Мокин Б.И., Ротштейн А.П. Soft Computing: идентификация закономерностей нечеткими базами знаний. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця.-2002.-145с.

Моргун Алла Серафимівна – завідувач кафедри промислового та цивільного будівництва.

Кательніков Денис Іванович – доцент кафедри програмного забезпечення, 54-73-88, fuzzy2dik@yahoo.com.

Моргун Іван Анатолійович – аспірант, т.52-46-61.

Вінницький національний технічний університет